บทที่ 3

ทฤษฎีและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

3.1 นิยามของคำศัพท์และพารามิเตอร์ที่ใช้

3.1.1 น้ำใต้ดิน - น้ำบาดาล - น้ำในดิน

พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน ปี พ.ศ. 2525 อธิบายความหมายของคำว่า "**น้ำใต้ดิน**" ว่า น้ำฝนที่ตกลงมาสู่พื้นดินแล้วไหลซึมไปรวมอยู่ใต้ดิน แต่ไม่มีการให้ความหมายของคำว่า "**น้ำบาดาล**"

พจนานุกรมฉบับเฉลิมพระเกียรติ ปี พ.ศ. 2530 ให้ความหมายคำว่า "**น้ำใต้ดิน**" เช่นเดียวกับพจนานุกรมฉบับ ปี 2525 แต่ได้เพิ่มเติมความหมายของคำว่า "**น้ำบาดาล**" ว่า หมายถึงน้ำใต้ดินที่อยู่ใต้หินชั้นล่าง

ตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 **น้ำบาดาล**หมายความว่า**น้ำใต้ดิน**ที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหินซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่จะกำหนดความลึกน้อยกว่าสิบเมตรมิได้ โดยที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537 กำหนดความลึกของน้ำบาดาลในกรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ สมุทรสาคร อยุธยาและนครปฐม อยู่ลึกจากผิวดินลงไปเกินกว่า 15 เมตร ความลึกของน้ำบาดาลในจังหวัดกาญจนบุรี กำแพงเพชร ชัยนาท นครสวรรค์ ลพบุรี สระบุรี สิงห์บุรี สุพรรณบุรี ฯลฯ อยู่ลึกจากผิวดินลงไปเกินกว่า 30 เมตร

เจริญ เชื่อมไธสง, 2522 และ เจริญ เพียรเจริญ, 2540 นิยามว่า **น้ำใต้ดิน** คือน้ำที่ไหลซึมลงไปใต้ดิน ไปถูกกักเก็บไว้ทั้งในดินและในหิน **น้ำในดิน** คือน้ำใต้ดินที่ซึมซาบอยู่ในดิน ลึกเท่าที่รากไม้จะหยั่งลงไปถึง มีประโยชน์โดยตรงสำหรับการเกษตรและการยังชีพของพืช (Soil water) ส่วน**น้ำบาดาล** หมายถึงน้ำใต้ดินที่เหลือจากที่ดินดูดอมไว้แล้วไหลซึมลึกลงต่อไปอีกเป็นช่วง ๆ และช่วงสุดท้ายถูกกักเก็บไว้ในช่องว่างทุกชนิดในเนื้อหินหรือชั้นหิน จนกระทั่งอิ่มตัวด้วยน้ำ

วจี และสมชัย, 2541 และ สมชัย, 2542 นิยาม **น้ำใต้ดิน** ว่าน้ำทุกชนิดที่อยู่ใต้พื้นดิน รวมทั้งน้ำที่รากพืชดูดไปใช้สำหรับการเจริญเติบโต ส่วน**น้ำบาดาล**คือน้ำที่เก็บอยู่ในช่องว่างหรือในรอยแตกของชั้นหินใต้พื้นดิน และช่องว่างดังกล่าวอิ่มตัวด้วยน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดให้**น้ำใต้ดิน** หมายถึง น้ำทั้งหมดที่อยู่ใต้ดิน แต่ในส่วนการศึกษาและพัฒนาแบบจำลอง จะมุ่งเน้นเฉพาะชั้น**น้ำบาดาล** คือชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำเพราะเป็นชั้นที่มีการใช้งานมาก มีความสำคัญ และมีข้อมูลเพียงพอสำหรับการศึกษา

3.1.2 **สัมประสิทธิ์การกักเก็บ** (Storage coefficient; S) คือปริมาตรของน้ำ ที่ชั้นน้ำปริมาตรหนึ่งหน่วยกักเก็บเข้าไว้หรือยอมให้ไหลออกมาได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเฉลี่ยหนึ่งหน่วย

3.1.3 **สัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ** (Specific storage; S_s) $S_s = S/b$ เมื่อ b คือความหนาของชั้นน้ำใต้ดิน

3.1.4 **สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ** (Transmissivity; T) คืออัตราการไหลต่อหน่วยเวลาของน้ำในตัวกลางรูพรุนผ่านพื้นที่หน้าตัดที่มีความกว้างหนึ่งหน่วยในทิศตั้งฉากการไหล ภายใต้ความแตกต่างของระดับพลังงานหนึ่งหน่วย

3.1.5 **สัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำ** (Hydraulic conductivity; K) $K = T/b$ เมื่อ b คือความหนาของชั้นน้ำใต้ดิน

3.1.6 **สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำแบบปรับหน่วย** (Normalized Transmissivity; T′) นิยาม T′=T/L เมื่อ L คือความยาวของท่อกรอง เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (T) ที่ได้จากผลการสูบทดสอบให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำ (K) โดยตั้งสมมติฐานว่าท่อกรองเจาะตลอดความหนาของชั้นน้ำ

3.1.7 **สัมประสิทธิ์ความจุจำเพาะ** (Specific capacity; S_C) คืออัตราส่วนของปริมาณน้ำที่สูบ (Q) ต่อระยะน้ำลด (s) ที่สภาวะสมดุล

3.1.8 **สัมประสิทธิ์ความจุจำเพาะแบบปรับหน่วย** (Normalized Specific capacity; S'_C) นิยาม $S'_C = S_C / L$ เมื่อ L คือความยาวของท่อกรอง เพื่อให้สอดคล้องกับการปรับหน่วยของพารามิเตอร์ T′

3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับสมการการไหลของน้ำใต้ดิน

สมการพื้นฐานในการอธิบายการไหลของของเหลวผ่านตัวกลางรูพรุน ซึ่งในที่นี้คือการไหลของน้ำใต้ดิน อาศัยสมการการไหลของ Darcy และสมการการไหลต่อเนื่องตามกฎการทรงมวล ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่สามารถนำมาเขียนในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial-differential) สำหรับกรณีการไหลแบบ 3 มิติ ได้ แล้วใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) มาช่วยในการแก้ชุดสมการเพื่อหาค่าคำตอบ เนื่องจากวิธีการเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่เหมาะกับปัญหาที่มีความซับซ้อน โดยใช้การแก้ปัญหาแบบ Finite-difference แบบ Implicit

สมการพื้นฐานของการไหลของของไหลผ่านตัวกลางรูพรุน คือ สมการของ Darcy ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$V = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \qquad (3\text{-}1)$$

โดยที่ V คือความเร็วการไหลของของไหล (LT^{-1})

K คือสัมประสิทธิ์การซึมได้ของของไหล (LT^{-1})

Δh คือความแตกต่างของระดับน้ำ หรือระดับความดันน้ำ (L)

Δl คือระยะทางวัดตามทิศทางความเร็วเฉลี่ยของการไหล (L)

สมการการไหลต่อเนื่องเป็นอีกเงื่อนไขหนึ่ง ซึ่งแสดงสมดุลของระบบการไหลของน้ำใต้ดิน มีรูปสมการดังนี้

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \qquad (3\text{-}2)$$

โดยที่ Q_i คืออัตราการไหลเข้าเซลล์ (L^3T^{-1})

S_s คือสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ (L^{-1})

ΔV คือปริมาตรของเซลล์ที่พิจารณา (L^3)

Δh คือการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของระดับน้ำใต้ดินในแต่ละเซลล์ (L) ในช่วงเวลา Δt (T)

โดยอาศัยสมการพื้นฐานของ Darcy และสมการการไหลต่อเนื่อง สามารถอธิบายการไหลของน้ำใต้ดินในสามมิติสำหรับชั้นน้ำที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ที่มีการไหลขึ้นกับทิศทาง (Anisotropic) ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady state) ด้วยสมการทั่วไปเชิงอนุพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}\right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (3\text{-}3)$$

I20832175

โดยที่ K_{ii} คือสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำตามแกน i (LT^{-1})

h คือความสูงระดับน้ำ (L)

W คือ Volume Metric Flux ต่อหน่วยปริมาตรทั้งจุดให้น้ำและจุดสูบน้ำ (T^{-1})

S_s คือสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ (L^{-1})

t คือเวลา (T)

K_{ii} และ S_s อาจมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตำแหน่ง ส่วน W มีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งและเวลา

การแก้สมการทั่วไปเชิงอนุพันธ์ดังกล่าว อาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยวิธี Finit-difference แบบ Implicit โดยการใช้ระบบกริดสี่เหลี่ยมในการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นแถว (Rows; i) หลัก (Columns; j) และชั้น (Layers; k) ทำให้ได้กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยกำหนดสมมติฐานให้แต่ละกริดเซลล์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด สำหรับกริดเซลล์หนึ่ง ในแถวที่ i หลักที่ j ชั้นที่ k จะมีความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ Δc_i , Δr_j , Δv_k ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์ของอัตราการไหลของกริดเซลล์ใด ๆ ในแต่ละด้านของกริดเซลล์ โดยวิธี Finit-difference แบบ Implicit ดังสมการที่ 3-4 ส่วนสมการของการไหลในด้านอื่น ๆ อีก 5 ด้านของแต่ละกริดเซลล์มีลักษณะเดียวกัน จึงไม่ได้แสดงรายละเอียดซ้ำอีก

$$q_{i,j-1/2,k} = K_{i,j-1/2,k}\Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \qquad (3\text{-}4)$$

โดยที่ $q_{i,j-1/2,k}$ คืออัตราการไหลของของไหลผ่านผิวหน้าระหว่างเซลล์ i,j,k และ i,j-1,k (L^3T^{-1})

$K_{i,j-1/2,k}$ คือสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำเฉลี่ยระหว่างเซลล์ i,j,k และ i,j-1,k (LT^{-1})

$\Delta c_i \Delta v_k$ คือพื้นที่หน้าตัดการไหลตามแนว j (L^2)

$h_{i,j,k}$ คือค่าระดับน้ำที่เซลล์ที่ i,j,k (L)

$\Delta r_{j-1/2}$ คือระยะห่างระหว่าง เซลล์ i,j,k และ i,j-1,k (L)

3.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำใต้ดิน

วิธีการวิเคราะห์ผลการสูบทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของชั้นน้ำ (T,S) สำหรับชั้นน้ำแบบมีความดันที่ไม่มีการรั่วซึม (Isotropic Nonleaky Confined aquifer) ที่มีการใช้แพร่หลายมีรูปสมการดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 วิธีการวิเคราะห์ผลการสูบทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของชั้นน้ำ

วิธีการวิเคราะห์	Theis	Cooper - Jacob	Theis Recovery
สมการในการหาค่า T	$T = \frac{QW(u)}{4\pi s}$	$T = \frac{2.303Q}{4\pi\Delta s}\Delta \log t$	$T = \frac{2.303Q}{4\pi\Delta s'}\Delta \log\left(\frac{t}{t'}\right)$
สมการในการหาค่า S	$S = \frac{4Ttu}{r^2}$	$S = \frac{2.25Tt_o}{r^2}$	$S = \frac{2.25Tt'_o}{r^2}$

หมายเหตุ $u = \frac{r^2 s}{4Tt}$ $W(u) = -0.5772 - \ln u - \sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-u)^n}{n \cdot n!}$ และ $\frac{\Delta s}{\Delta \log t}$ คือความชันของกราฟระหว่าง S กับ log t

วิธีการ Theis และ Cooper-Jacob จำเป็นต้องใช้บ่อสังเกตการณ์ในการคำนวณหาค่า T แต่วิธี Theis-Recovery สามารถคำนวณจากข้อมูลบ่อสูบโดยไม่ต้องมีบ่อสังเกตการณ์ทำให้สะดวกและสอดคล้องกับข้อมูลที่มีในพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ดี วิธี Theis หรือ วิธี Cooper-Jacob อาจใช้คำนวณได้โดยประมาณในกรณีที่ไม่มีบ่อสังเกตการณ์ โดยให้ค่า r ในสมการเป็นขนาดรัศมีของบ่อสูบ

การประเมินค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำใต้ดินโดยการสูบทดสอบเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลามาก จึงมีการศึกษามากมายที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จากข้อมูลอื่น อาทิเช่น ขนาดของวัสดุชั้นน้ำ สัมประสิทธิ์ความจุจำเพาะ การแกว่งของระดับน้ำใต้ดิน ผลการทดสอบการนำไฟฟ้า (E-logging), รวมทั้งการอาศัยระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณย้อนกลับจากแบบจำลองน้ำใต้ดิน (Inverse modeling) และวิธีปัญญาประดิษฐ์ โดยอาศัยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 1.4.2

3.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ในการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง

วัตถุประสงค์ หรือหลักการของการปรับเทียบคือการลดความคลาดเคลื่อน (Error) ให้เหลือน้อยที่สุด คำว่าความคลาดเคลื่อนนั้นสามารถอธิบายได้ 3 วิธี คือ

1. ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Error; ME) คือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่วัดจากสนาม (h_f) และค่าที่ได้จากแบบจำลอง (h_m) ตามสมการที่ 3-5 โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการปรับเทียบ (เท่ากับจำนวนข้อมูลจากสถานีตรวจวัดระดับน้ำที่มี) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยนี้ทำการคำนวณได้ง่ายแต่มีจุดอ่อนเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นบวกและลบจะถูกคำนวณรวมกันและอาจจะชดเชยกันไป ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ต่ำอาจมิได้หมายถึงผลการปรับเทียบที่ดีเสมอไป

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(h_f - h_m)_i \qquad (3\text{-}5)$$

2. ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error; MAE) คือค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างค่าที่วัดจากสนาม (h_f) และค่าที่ได้จากแบบจำลอง (h_m) ตามสมการที่ 3-6

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|(h_f - h_m)_i\right| \qquad (3\text{-}6)$$

3. ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error; RMS) หรือค่าความแปรปรวนมาตรฐาน (Standard deviation) นิยามตามสมการที่ 3-7

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(h_f - h_m)_i^2} \qquad (3\text{-}7)$$

3.5 หลักการที่ใช้ในการประเมินอัตราการสูบน้ำใต้ดิน

จากการสำรวจในภาคสนาม และการสัมภาษณ์ผู้ใช้น้ำในพื้นที่ศึกษา (ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก n) รวมทั้งผลการศึกษาของโครงการศึกษาศักยภาพและความต้องการใช้น้ำใต้ดินในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง พบว่า น้ำใต้ดินถูกนำมาใช้ในกิจกรรม 3 ประเภท คือ การอุปโภคบริโภค อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ดังนั้นในเบื้องต้นสามารถกำหนดกรอบในการประเมินปริมาณการใช้น้ำใต้ดินในพื้นที่ (Q) ได้ตามสมการที่ 3-8 และเนื่องจากอัตราการใช้น้ำใต้ดินนี้เป็นปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น ตัวแปรในสมการดังกล่าวทุกตัวจึงเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา

$$Q_t^{total} = Q_t^{อุปโภค} + Q_t^{เกษตร} + Q_t^{อุตสาหกรรม} \qquad (3\text{-}8)$$

การใช้น้ำใต้ดินเพื่อการอุปโภคบริโภคในเขตเมืองที่มีระบบประปาขนาดใหญ่ เช่นการประปาภูมิภาค มีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับพื้นที่ที่ไม่มีระบบดังกล่าว ซึ่งประชาชนใช้น้ำจากระบบประปาหมู่บ้าน และ/หรือบ่อน้ำใต้ดินส่วนตัว ดังนั้นการประเมินปริมาณการใช้น้ำใต้ดินเพื่อการอุปโภคบริโภคจึงคำนวณได้ตามสมการที่ 3-9

$$Q_t^{อุปโภค} = Q_t^{ในเขตเมือง} + Q_t^{นอกเขตเมือง} \quad (3\text{-}9)$$

โดยที่ $Q_t^{ในเขตเมือง}$ หาได้จากข้อมูลการผลิตน้ำประปาในเดือนต่าง ๆ จากการประปาภูมิภาค และกรมโยธาธิการซึ่งดูแลระบบประปาเทศบาลและประปาเอกชน ส่วน $Q_t^{นอกเขตเมือง}$ คือปริมาณน้ำใต้ดินจากระบบประปาหมู่บ้านรวมกับปริมาณน้ำใต้ดินจากบ่อน้ำส่วนตัว ตามสมการที่ 3-10, 3-11 และ 3-12

$$Q_t^{นอกเขตเมือง} = Q_t^{ประปาหมู่บ้าน} + Q_t^{บ่อส่วนตัว} \quad (3\text{-}10)$$

$$Q_t^{ประปาหมู่บ้าน} = q^{ประปาหมู่บ้าน} * N_t^{ประปาหมู่บ้าน} \quad (3\text{-}11)$$

$$Q_t^{บ่อส่วนตัว} = q^{บ่อส่วนตัว} * \left(N_t^{กชช.} * F^{อุปโภค}\right) \quad (3\text{-}12)$$

โดยที่ $q^{ประปาหมู่บ้าน}$ คืออัตราการผลิตของระบบประปาหมู่บ้าน

$N_t^{ประปาหมู่บ้าน}$ คือจำนวนระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่ ในเวลาที่พิจารณา

$q^{บ่อส่วนตัว}$ คืออัตราการให้น้ำเฉลี่ยของบ่อส่วนตัวในพื้นที่ที่พิจารณา ซึ่งหาได้จากข้อมูลสำรวจภาคสนาม

$N_t^{กชช.}$ คือจำนวนบ่อน้ำใต้ดินของประชาชนทั้งหมดในพื้นที่ที่พิจารณา ซึ่งได้จากข้อมูลของ กชช.2ค.

$F^{อุปโภค}$ คือสัมประสิทธิ์ที่เป็นอัตราส่วนของจำนวนบ่อที่ประชาชนใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคเทียบกับจำนวนบ่อน้ำใต้ดินทั้งหมด ซึ่งหาได้จากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม

ส่วนปริมาณการใช้น้ำเพื่อเกษตรกรรม แม้จะไม่มีการเก็บบันทึกข้อมูลอย่างเป็นทางการ แต่จากการศึกษา สำรวจและทดสอบในภาคสนาม (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) สามารถกำหนดหลักการในการประเมินได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_t^{เกษตร} = q_t^{เกษตร} * \left(N_t^{กชช.} * F^{เกษตร}\right) \quad (3\text{-}13)$$

$$q_t^{เกษตร} = f_t^{เดือน,ปี} * \left(\bar{q} * \bar{t}\ \right) \quad (3\text{-}14)$$

โดยที่ $q_t^{เกษตร}$ คืออัตราการสูบน้ำเฉลี่ยของบ่อน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่พิจารณา

$F^{เกษตร}$ คือสัมประสิทธิ์ที่เป็นอัตราส่วนของจำนวนบ่อที่ประชาชนใช้เพื่อการเกษตรเทียบกับจำนวนบ่อน้ำใต้ดินทั้งหมด ซึ่งหาได้จากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม

$\bar{q}$ คืออัตราการให้น้ำโดยเฉลี่ยของบ่อน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่พิจารณา ซึ่งได้จากการสูบทดสอบในภาคสนาม

$\bar{t}$ คือระยะเวลาโดยเฉลี่ยของการสูบน้ำใต้ดินในสถานการณ์แล้งที่สุด (ฤดูแล้งปี พ.ศ. 2597 และ 2542)

หากกำหนดให้ $f_t^{เดือน,ปี}$ เท่ากับ 1 สมการที่ 3-14 จะเท่ากับอัตราการสูบน้ำเฉลี่ยของบ่อน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่พิจารณาในกรณีที่มีสภาวะแล้งสูงสุด กล่าวคือเป็นฤดูแล้งของปีที่แล้งมากที่สุดตามเกณฑ์กำหนดของกรมชลประทาน ซึ่งตรงกับช่วงเวลาที่ทำการสำรวจในภาคสนาม ดังนั้น ในการประเมินอัตราการสูบน้ำใต้ดินเฉลี่ยสำหรับช่วงเวลาอื่นของปี ซึ่งมีฤดูกาลแตกต่างกัน และสำหรับปีอื่น ๆ ซึ่งมีสถานการณ์น้ำโดยรวมของแต่ละปีต่างกัน ก็สามารถกระทำได้โดยกำหนดสัมประสิทธิ์แทนความผันแปรทั้งสองนั้น และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจากข้อมูลภาคสนามที่สำรวจได้ ประกอบกับการตรวจสอบด้วยแบบจำลองในขั้นตอนของการปรับเทียบ โดยที่ $f_t^{เดือน,ปี}$ คือสัมประสิทธิ์การสูบน้ำรายเดือน และรายปี ซึ่งกำหนดได้จากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม ตามสภาพแหล่งน้ำผิวดินและความต้องการใช้น้ำในแต่ละเดือน ทั้งนี้ขึ้นกับสถานการณ์ความแห้งแล้งในแต่ละปี ตามเกณฑ์ของกรมชลประทาน

สำหรับปริมาณการใช้น้ำใต้ดินเพื่ออุตสาหกรรม แม้จะมีการบันทึกข้อมูลอย่างเป็นทางการกล่าวคือ ผู้ใช้น้ำใต้ดินต้องขออนุญาตต่อทรัพยากรธรณีจังหวัด แต่ปริมาณการใช้น้ำจริงมีความแตกต่างจากปริมาณที่อนุญาตตามใบอนุญาต ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงกำหนดสมการสำหรับการประเมินอัตราการใช้น้ำใต้ดินเพื่ออุตสาหกรรมตามสมการที่ 3-15

$$Q_t^{อุตสาหกรรม} = f^{อุตสาหกรรม} * \sum q_t^{อุตสาหกรรม} \quad (3\text{-}15)$$

โดยที่ $q_t^{อุตสาหกรรม}$ คือปริมาณการใช้น้ำใต้ดินตามใบอนุญาตของทรัพยากรธรณีจังหวัด

$f^{อุตสาหกรรม}$ คือสัมประสิทธิ์การใช้น้ำเพื่ออุตสาหกรรมเทียบกับใบอนุญาต ซึ่งได้จากการสำรวจภาคสนาม

3.6 หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระดับน้ำใต้ดินกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณระดับน้ำใต้ดินจากแบบจำลอง กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง หากกำหนดสมมติฐานจากผลการศึกษาที่ผ่านมาว่า ปัจจัยหลักที่น่าจะสะท้อนค่าระดับน้ำ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาได้ ได้แก่ อัตราการสูบน้ำ การเติมน้ำ และพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของแต่ละพื้นที่ ดังนั้นอัตราการสูบน้ำที่เกิดขึ้นในพื้นที่หนึ่ง ๆ ย่อมไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าระดับน้ำที่เกิดขึ้นในเวลานั้น ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะอัตราการเติมน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องโดยตรงเช่นกันต่อการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในระบบ ดังนั้นเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปนี้ จึงกำหนดปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่าระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่หนึ่ง ๆ เรียกว่า "อัตราการสูบน้ำสุทธิ" โดยนิยามให้ "อัตราการสูบน้ำสุทธิ" ในเวลาใด ๆ เท่ากับอัตราการสูบน้ำในพื้นที่ลบด้วยอัตราการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในเวลานั้น ๆ ในพื้นที่ที่พิจารณา จากนั้นจึงทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำที่เกิดขึ้นจากอัตราการสูบน้ำสุทธิในแต่ละรอบฤดูกาล โดยอาศัยข้อมูลจากผลการจำลองสภาพที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

3.7 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองสภาพน้ำใต้ดินในพื้นที่ด้านบนของที่ราบภาคกลางตอนล่าง ครั้งนี้ ได้นำแบบจำลอง MODFLOW และแบบจำลอง GMS มาใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.7.1 แบบจำลอง MODFLOW

แบบจำลอง MODFLOW (a Modular Three-dimensional Finite-difference Groundwater Flow Model) ได้รับการพัฒนาโดย USGS ตั้งแต่ปี 1988 สามารถทำการคำนวณการไหล 3 มิติ ของน้ำใต้ดินที่ความหนาแน่นคงที่ผ่านตัวกลางรูพรุน (porous media) โดยอาศัยสมการ Darcy และสมการการไหลต่อเนื่องเป็นสมการหลักในการคำนวณ ประกอบกับเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ สร้างเป็นแบบจำลองสำหรับการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่หนึ่ง ๆ แล้วทำการคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ โดยวิธี Finite difference เพื่อแก้สมการดังกล่าวให้ได้คำตอบโดยประมาณ ด้วยเทคนิควิธีการคำนวณซ้ำ 2 วิธี คือ วิธี Strongly Implicit Procedure และวิธี Slice Successive Overrelaxation

การจำลองสภาพโดยแบบจำลอง MODFLOW สามารถจำลองสภาพทางอุทกธรณีวิทยาได้ทั้งแบบที่เป็นชั้นน้ำแบบมีความดัน และไม่มีความดัน และสามารถคำนวณชุดข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้ อาทิเช่น อัตราการสูบน้ำ การเติมน้ำ การคายระเหย การระบายน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในทางน้ำกับน้ำใต้ดิน

แบบจำลอง MODFLOW ประกอบขึ้นด้วยชุดการคำนวณที่มีหน้าที่จัดการข้อมูลต่าง ๆ กัน ทั้งหมด 10 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 3-2 ซึ่งในการคำนวณทั่วไป ชุดการคำนวณ Basic และ ชุดการคำนวณ Block Centered Flow เป็นชุดการคำนวณพื้นฐานของการคำนวณทุกครั้ง

ในการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินประกอบขึ้นด้วยชุดการคำนวณทั้ง 10 ชุดซึ่งต้องการข้อมูลและพารามิเตอร์แตกต่างกัน แต่ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ชุดการคำนวณหลัก 7 ชุด ได้แก่ ชุดการคำนวณพื้นฐาน ชุดพารามิเตอร์การไหล ชุดข้อมูลการสูบน้ำ ชุดข้อมูลการเติมน้ำ ชุดข้อมูลทางน้ำ ชุดข้อมูลระดับน้ำ และชุดควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ โดยแต่ละชุดใช้ข้อมูลตามรายการที่แสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ชุดการคำนวณในแบบจำลอง MODFLOW

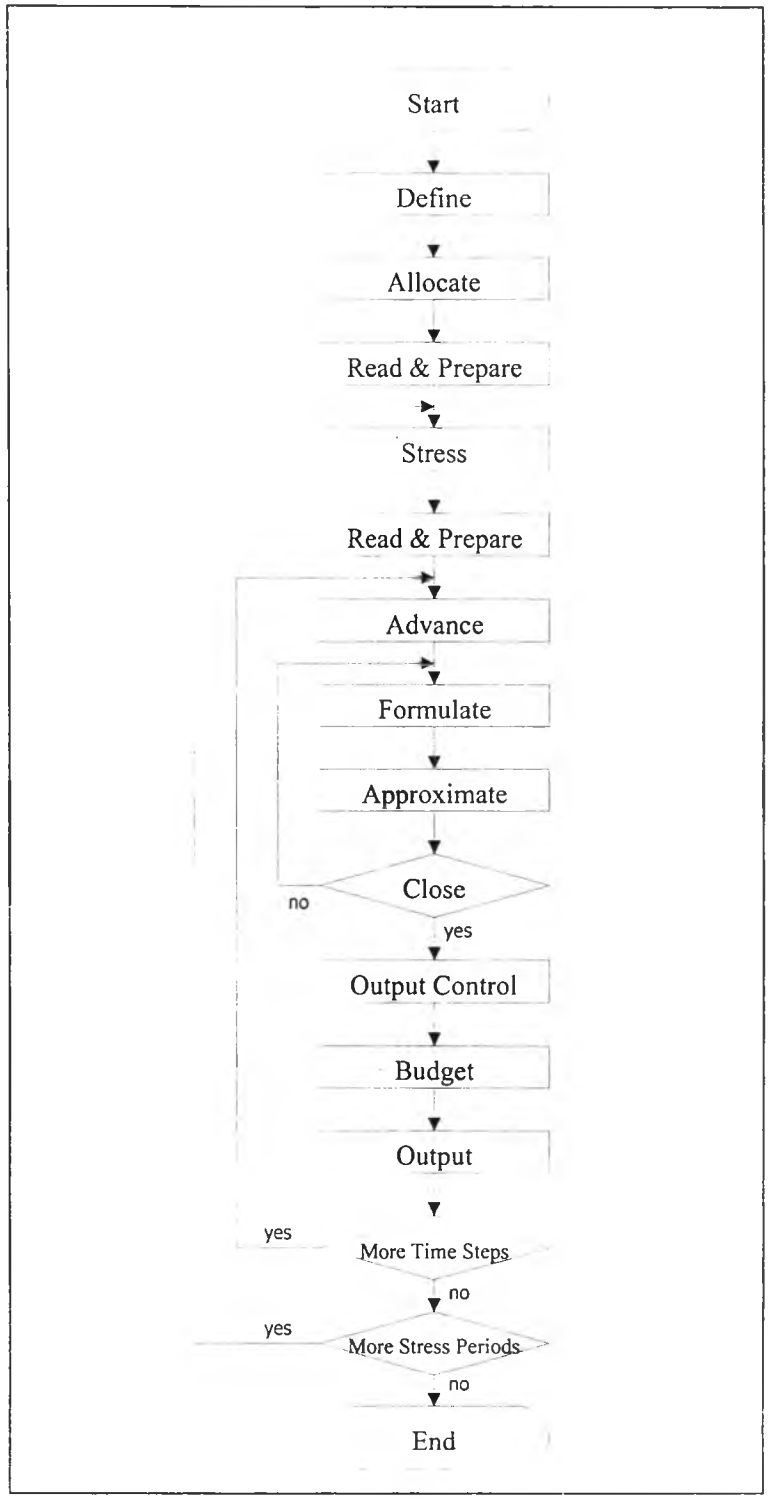
ชื่อชุดการคำนวณ	หน้าที่
Basic	จัดการพื้นฐานของแบบจำลอง เช่นการกำหนดขอบเขต, ระบบกริด ช่วงเวลาในการคำนวณ , เงื่อนไขตั้งต้น และรูปแบบการนำเสนอผลลัพธ์
Block Centered Flow	กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ของการไหลในตัวกลางรูพรุนในแต่ละกริดเซลล์ เช่น ค่าพารมิเตอร์ทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำ
Well	จัดการข้อมูลการสูบน้ำ ที่ตั้งบ่อน้ำใต้ดิน และพจน์ที่เกี่ยวข้องในสมการเชิงอนุพันธ์
Recharge	จัดการข้อมูลการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน และพจน์ที่เกี่ยวข้องในสมการ
River	จัดการข้อมูลทางน้ำ และระดับน้ำในทางน้ำ ซึ่งมีผลต่อการไหลของน้ำใต้ดิน
Drain	จัดการข้อมูลการระบายน้ำ
Evapotranspiration	จัดการข้อมูลการคายระเหย
General Head Boundary	กำหนดระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำต่าง ๆ ในการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์
Strongly Implicit Procedure	ควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาระบบสมการ Finite Difference โดยการคำนวณซ้ำแบบ Implicit
Slice Successive Overrelaxation	ควบคุมระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาระบบสมการ Finite Difference

การคำนวณตามแบบจำลอง MODFLOW มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3-1 และมีรายละเอียดดังนี้

1) การกำหนดสภาพปัญหาที่ทำการจำลองสภาพ (Define Procedure) เช่น ขนาดและชนิดของแบบจำลอง (Steady state / Transient) จำนวนช่วงระยะเวลาในการคำนวณ และวิธีการแก้ปัญหา
2) การจัดสรรตำแหน่งของหน่วยความจำ (Allocate Procedure)
3) การเตรียมข้อมูลที่ไม่เกี่ยวกับเวลา (Read & Prepare Procedure ครั้งที่ 1) เช่น เงื่อนไขขอบเขต ระดับน้ำเริ่มต้น พารามิเตอร์ของชั้นน้ำ เป็นต้น
4) การกำหนดความยาวของระยะเวลาในการคำนวณแบบซ้ำ (Stress Procedure)
5) การเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวกับ Stress Period การสูบน้ำ และการเติมน้ำ เป็นต้น (Read & Prepare Procedure ครั้งที่ 2)
6) การเริ่มต้นการคำนวณซ้ำ เพื่อหาค่าระดับน้ำ (Advance Procedure)
7) การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละจุด (Formulate Procedure)
8) การประมาณคำตอบของสมการค่าระดับน้ำ (Approximate Procedure) ซึ่งจะทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องตามเงื่อนไขที่กำหนด

9) การกำหนดรูปแบบผลการคำนวณ (Output Control Procedure) เช่นค่าระดับน้ำที่คำนวณได้ สมดุลน้ำ และปริมาณการไหลในแต่ละกริด

10) การแสดงผลการคำนวณตามที่กำหนด (Output Procedure)



รูปที่ 3-1 โครงสร้างหลักของแบบจำลอง MODFLOW

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลที่ใช้ในชุดการคำนวณของ MODFLOW

ชื่อชุดการคำนวณ	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
Basic	จำนวนชั้นน้ำหลัก และแถวของระบบกริด ค่าระดับน้ำเริ่มต้น จำนวน stress period จำนวนช่วงเวลา และขอบเขต
Block Centered Flow	สภาพการจำลอง ชนิดของชั้นน้ำ ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำ สัมประสิทธิ์การกักเก็บ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวดิ่ง
Well	จำนวน/ ตำแหน่ง ของบ่อน้ำใต้ดิน อัตราการสูบน้ำ ในแต่ละช่วงเวลา
Recharge	พื้นที่ในการเติมน้ำ อัตราการเติมน้ำในแต่ละช่วงเวลา
River	ตำแหน่ง รูปร่างของทางน้ำ ระดับน้ำ และคุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำ
General Head Boundary	ค่าระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำต่าง ๆ
Strongly Implicit Procedure	ค่าเงื่อนไขในการคำนวณซ้ำในแต่ละช่วงเวลา และรายละเอียดของการคำนวณ

3.7.2 แบบจำลอง GMS

แบบจำลอง GMS (Groundwater Modeling System) ทำหน้าที่จัดการและเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างผู้ใช้ กับแบบจำลอง MODFLOW และช่วยแสดงผลการคำนวณในแบบรูปภาพ การทำงานของ GMS แสดงได้ดังรูปที่ 3-2

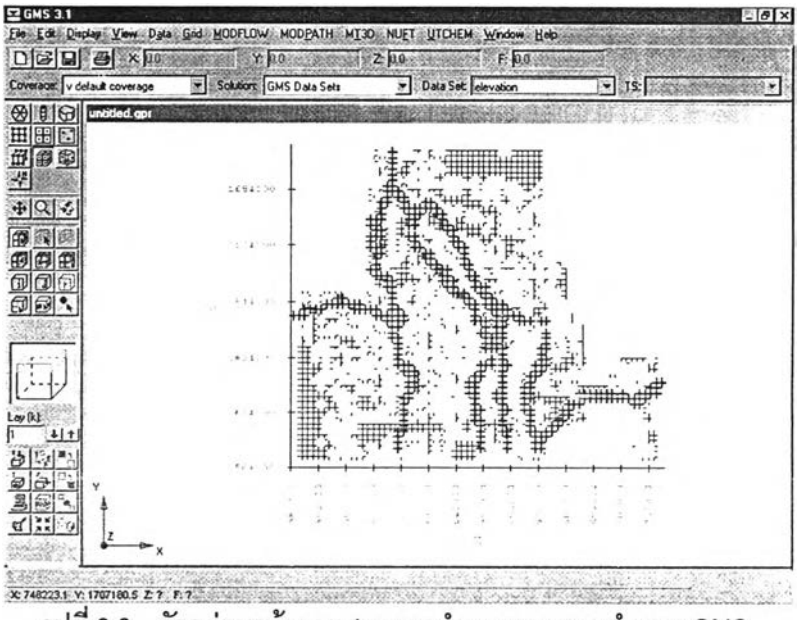
แบบจำลอง GMS เป็นผลงานของห้องทดลองคอมพิวเตอร์กราฟฟิก ของมหาวิทยาลัย Brigham Young ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเริ่มพัฒนาโปรแกรมนี้ตั้งแต่ปี 1991 คุณสมบัติที่สำคัญของ GMS คือสามารถใช้งานในแต่ละขั้นตอนของการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินได้ครบถ้วน ตั้งแต่การประมวลผลข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำใต้ดินเพื่อทำการแบ่งประเภทของชั้นน้ำที่จะใช้ในแบบจำลอง การกำหนดลักษณะพื้นที่ การแบ่งกลุ่มพื้นที่ รวมทั้งการนำเข้าข้อมูลต่าง ๆ สำหรับการสร้างแบบจำลอง ส่วนการแสดงผลการคำนวณที่ได้จาก MODFLOW นั้น GMS สามารถแสดงการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ เพื่อใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง แล้วแสดงผลในมุมมองต่างๆ ได้โดยง่าย สามารถใช้งานร่วมกับแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ ได้หลากหลาย อาทิ MODFLOW, MODPATH, MT3D, RT3D, FEMWATER, SEEP2D เป็นต้น โดยใช้คำสั่งจาก GMS โดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถรับ และส่งข้อมูล GIS กับโปรแกรมต่าง ๆ เช่น ArcView, ArcInfo, Grass ในรูปแบบ DXF ได้ และยังสามารถถ่ายโอนข้อมูล หรือผลการคำนวณไปยังรูปแบบข้อมูล อื่น ๆ ได้ อาทิเช่น dBASE, EXCEL ฯลฯ โดยทำงานได้ทั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนตัว และระบบ Unix

การเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างแบบจำลอง GMS และ MODFLOW ทำให้ GMS สามารถส่งผ่านข้อมูลจากระบบแผนที่ บ่อเจาะ การแบ่งชั้นน้ำ และข้อมูลอื่น ๆ ให้กับ MODFLOW เพื่อทำการทดสอบเบื้องต้นว่าการแบ่งชั้นต่าง ๆ มีความสอดคล้องกับการไหลทางชลศาสตร์เพียงใด ค่าที่ MODFLOW คำนวณได้สามารถถ่ายโอนเพื่อแสดงออกในระบบแผนที่ของ GMS ได้ทันที (รูปที่ 3-3) ในลักษณะเดียวกันนี้ในการนำเข้าข้อมูล การคำนวณ และการแสดงผลลัพธ์ ทำการการจำลองสภาพ และการปรับเทียบแบบจำลองสามารถทำได้สะดวกยิ่งขึ้น และใช้เวลาน้อยลง

ชุดการทำงานของ GMS มี 10 ชุด เพื่อช่วยในการจัดการข้อมูลประเภทต่าง ๆ ซึ่งแสดงรายการได้ดังนี้

1) Triangulated Irregular Network (TIN) Module เป็นส่วนที่ใช้เพื่อการแสดงพื้นผิว ของกลุ่มชั้นน้ำตามสภาพทางอุทกธรณีวิทยา โดยการเชื่อมโยงจุดข้อมูลในระบบแกน 3 มิติ แล้วแสดงผลในระบบกริด ด้วยการให้สี หรือการสร้างเส้นช่วงชั้นความสูง
2) Borehole Module ช่วยในการแสดงผลการสำรวจทางอุทกธรณีวิทยา โดยสามารถนำเข้าข้อมูลในรูปของ Text file แล้วแสดงผลและเชื่อมโยงข้อมูลในตำแหน่งต่าง ๆ และใช้ในการสร้าง TINs, Solid Mesh และ 3D Mesh
3) Solid Module ใช้ในการสร้างขอบเขตชั้นน้ำต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลอง และสามารถสร้างภาพตัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้
4) 2D Mesh Module ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ
5) 2D Grid Module ใช้ในการสร้างระบบกริดของแบบจำลอง 2 มิติ โดยสามารถนำเข้าข้อมูลจาก2D Scatter Point Module
6) 2D Scatter Point Module ใช้ในการคำนวณค่าระหว่างจุด (Interpolate) จากกลุ่มข้อมูล 2 มิติ
7) 3D Mesh Module ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ
8) 3D Grid Module ใช้ในการสร้างระบบกริดของแบบจำลอง 3 มิติ โดยสามารถนำเข้าข้อมูลจาก3D Scatter Point Module
9) 3D Scatter Point Module ใช้ในการคำนวณค่าระหว่างจุด (Interpolate) จากกลุ่มข้อมูล 3 มิติ
10) Map Module ใช้ในการแสดงภาพแผนที่ของแบบจำลอง และผลการจำลองสภาพ และสามารถเชื่อมโยงข้อมูลเป็น ARC/INFO ได้

รูปที่ 3-2 โครงสร้างการทำงานระหว่าง GMS และ MODFLOW



รูปที่ 3-3 ตัวอย่างหน้าจอแสดงการทำงานของแบบจำลอง GMS